

基于黑色通道的图像快速去雾优化算法

褚宏莉¹, 李元祥¹, 周则明², 沈 霁¹

(1. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240; 2. 解放军理工大学气象学院, 江苏南京 211101)

摘要: 黑色通道优先算法在处理单幅户外场景图像去雾方面取得了一定的效果,但是该方法需要消耗大量的存储和计算资源,另外对天空区域的处理不够准确.本文仍然基于黑色通道先验知识,对图像边缘和非边缘分别采用不同的模板处理得到透射图,并通过分割天空区域或者雾最浓区域求得准确的大气光值,利用该方法可以恢复出和原方法基本一致甚至更准确的结果,并且可以大大减少消耗,提升计算速度.

关键词: 图像复原; 黑色通道; 去雾; 天空区域

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2013) 04-0791-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.04.028

Optimized Fast Dehazing Method Based on Dark Channel Prior

CHU Hong-li¹, LI Yuan-xiang¹, ZHOU Ze-ming², SHEN Ji¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

Abstract: The dark channel prior algorithm is effective to some extent when working on some single outdoor scene hazing images. However, it has to expend large amounts of memory storage and computational time. Besides, the result of the sky region is not accurate enough. In this paper, we estimate the transmission map through processing the edges and non-edges respectively with different neighborhoods and obtain more accurate atmospheric light value by departing the sky part or the most hazed region of the image. This method can get a similar or even a better dehazing result than the classical haze removal methods, and moreover take less memory consumption and get much faster computational speed.

Key words: image restoration; dark channel prior; dehazing; sky region

1 引言

在雾天天气下,空气中会漂浮着大量颗粒,光在大气中传播时会受到这些悬浮颗粒的影响,造成光的吸收和散射,从而导致图像模糊不清,对比度下降等退化现象,特别对彩色图像来说还会出现严重的颜色失真和错位,给很多应用造成困难,如高速公路上的视频监控器无法清楚监测车辆信息.因此,得到清晰的图像越来越成为重要的课题,各国研究人员也都展开相应的研究.

近年来,利用单幅图像去雾的研究取得了很大进展. Tan^[1]利用最大化局部对比度方法来恢复图像的色彩对比,在某些场景图像上取得了较好效果,但是该方法并不符合真实的物理模型,得到的结果容易失真. Fattal^[2]假设阴影和透射率是不相关的,利用 ICA 模型估计透射率,从而得到去雾结果,但是该方法不能很好的处理浓雾图像. He^[3]等人提出了暗通道优先法则(统计结果表明绝大部分户外照片符合该法则),利用该法则去雾,对大多数户外照片都能得到很好的效果,但是在

某些黑色通道不接近于 0 的区域会出现偏差,导致结果失真,并且优化透射图的 soft matting 算法会消耗大量时间.方帅^[4]等人提出一种单幅雾天图像分割复原方法,利用黑体原理估计粗糙的大气光传输图,再用图像修补的方法对传输图进行平滑操作,但是复杂的修补方法导致图像的处理速度非常慢.

本文在 He 算法的基础上,通过准确求解天空区域或者雾最浓区域得到大气光 A ,并对图像边缘和非边缘部分分别求解黑色通道得到透射图 t ,大大提升优化速度,改善恢复效果.

2 暗通道先验知识基本原理

2.1 基本模型

在计算机视觉和计算机图形学中,描述雾天图像的基本模型^[1,2,3]为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (1)$$

式(1)中, $J(x)$ 是来自目标的辐射信息; $t(x)$ 是传输衰减函数,表示目标辐射信息的透射率; $J(x)t(x)$ 为目标

辐射信息的直接衰减,描述了来自目标的电磁波信息经过传输介质到达传感器的能量; A 是大气光成分, $A(1-t(x))$ 代表大气光经过衰减后到达传感器的能量.

我们的目的是从雾天图像 $I(x)$ 中恢复出晴天下的图像 $J(x)$,而大气光 A 和透射率 t 都是未知的,这使得式(1)是一个无解方程,因此需要引入其他辅助信息. He 算法中引入了黑色通道先验知识.

如果大气光 A 和透射图 t 已知,就可以利用式(2)进行图像去雾处理.

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (2)$$

其中 t_0 是最小透射率限制处理,为了防止某些像素的透射率 t 太小而导致恢复后的结果成为噪声点. He 算法中, t_0 为 0.1.

2.2 黑色通道先验知识

经过统计发现,对于户外晴天下图像的非天空区域,在 r, g, b 三个通道中至少有一个通道其像素值非常小,即 $\min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(y))$ 非常小,其中 y 是图像 J 的某一像素, J^c 是该像素 y 的某一颜色通道. 若选择某一像素 x 的邻域 $\Omega(x)$ 内所有像素 $\min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(y))$ 的最小值作为该像素的黑色通道 $J^{\text{dark}}(x)$, 则其值非常接近于 0, 即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(y)) \right) \rightarrow 0 \quad (3)$$

3 基于黑色通道的快速优化方法

3.1 改进透射图的求解



(a) 输入图像



(b) He算法得到的大气光值所在区域

(c) He算法未优化透射图 t' (d) 使用 t' 计算的去雾结果 J' (e) He算法优化透射图 t (f) 使用 t 计算的去雾结果 J (g) $|J-J'|$ 

(h) 本文方法求得的大气光值所在区域



(i) 仅对大气光进行改进后的透射图



(j) 仅对大气光进行改进后的恢复结果



(k) 改进大气光和优化之后的透射图



(l) 改进大气光和优化透射图之后的去雾结果

3.1.1 背景

由文献[3]可知,在大气光 A 已知时,根据式(4)可以求得透射图,即

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \left(\frac{F^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (4)$$

其中, $\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \left(\frac{F^c(y)}{A^c} \right) \right)$ 可以看作 $\frac{F^c(y)}{A^c}$ 的黑色通道, A 是已知的大气光, ω 是为了防止彻底去雾导致失真而设置的常量参数, He 算法中设置 ω 为 0.95. 利用式(4)求解时,需要假设某像素的邻域 $\Omega(x)$ 内,其透射率都是相等的,而实际中像素与像素之间的透射率并不一定相等,因此求得的透射图与实际有一定的偏差,导致得到的透射图是一块一块的形状,如图 1(c) 所示. 块的大小由选择的邻域模板 Ω 大小来决定,选择邻域 Ω 越大,该偏差也会越大. 在 He 算法中,对整幅图像都采用 Ω 大小为 15×15 的模板,虽然模板越大, $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 的程度越大,但同样也会造成边界信息不精确,形成严重的晕斑现象,如图 2(b) 所示;而模板越小,透射图越精确. 在得到不精确的透射图之后采用 soft matting 算法对其进行优化,对于一幅 400×600 大小的图片, soft matting 算法中的 Matting Laplacian 矩阵 L 的大小为 240000×240000 ,这是一个非常庞大的矩阵,其计算量也就可想而知. 因此我们综合考虑模板对 J^{dark} 和透射图的影响,不采用 soft matting 算法,通过改变邻域 Ω 大小来最大程度的降低偏差,缩短计算时间.

3.1.2 优化透射图

由文献[6]可知,利用未优化的透射图 t' 和用 soft

图1 (源自文献[3])He算法与本文方法比较

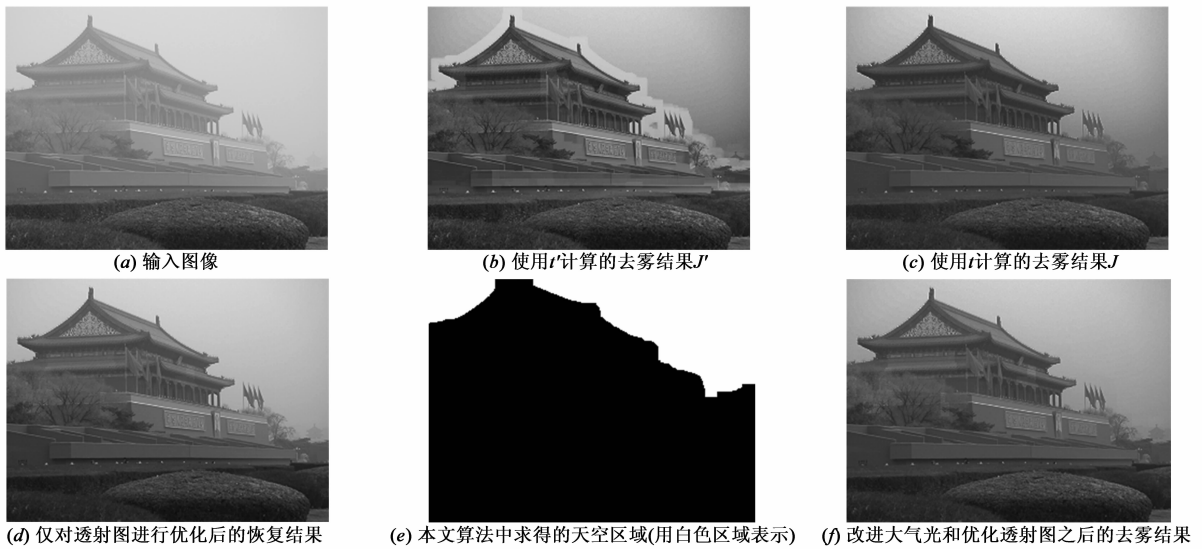


图2 (源自文献[3])He算法与本文算法比较

matting 算法优化后的透射图 t 分别求得恢复后的图像在场景深度突变区域差异比较明显,即在边缘处透射图误差最大,而在其他大部分区域差异都很小,如图 1 (g)所示.由于边缘处需要保持其细节信息,故应采用小模板计算黑色通道;而在非边缘处,图像亮度变化比较平缓,透射图误差较小,对细节要求不高,应该保持其 J^{dark} ,故采用大模板计算黑色通道.整幅图像的黑色通道 J^{dark} 即为边缘处的黑色通道 $J_{\text{edge}}^{\text{dark}}$ 与非边缘处的黑色通道 $J_{\text{nonedge}}^{\text{dark}}$ 之和.

另外,黑色通道本身就粗略地代表了深度信息.对于黑体,不反射外界的光,如果不受大气光的影响,其亮度为 0,受到大气光的影响,黑体亮度会增大.在一定范围内,雾越浓,天空中浮尘微粒越多,大气光散射越严重,黑体受到大气光的影响越大,亮度也就越大.黑体离传感器越远,即 d 越大,雾就越浓,其亮度也就越大.因此在雾天条件下,黑体离相机的距离 d 和黑体的亮度正相关,即深度和亮度正相关.黑色通道是利用的黑体模型,在晴天下不受大气光影响时,呈黑色,雾天条件下,受到大气光的影响,亮度随距离增大而增大,这样相应地提供了深度信息,黑色通道的亮度越大说明雾越浓,则物体离传感器的距离越远,即 d 越大.

求得深度图 $d(x)$ 以后,利用光在大气介质中的传播理论计算透射率:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (5)$$

其中, β 是大气光散射系数,其对所有可见光来说是一样的,另外在均匀介质中,可认为 β 为恒定值[7].

优化透射图的实现步骤如下:

- (1)提取图像的边缘信息(如用 sobel 算子),获取透射图中梯度变化最明显的区域 I_{edge} ;
- (2)扩展该区域 I_{edge} 的宽度,得到扩展后的二值图像 \tilde{t} .

(计算边缘信息占总像素的比,若比值较大(如大于 50%),即边缘信息比较丰富,则进行小邻域扩展,如扩展邻域 $\text{neighbors} = 8$;若比值较小(小于 50%),则可以适当增大扩展邻域,如 $\text{neighbors} = 12$);

(3)对该二值图像 \tilde{t} 的边缘区域利用小模板(如 3×3)求黑色通道 $I_{\text{edge}}^{\text{dark}}$,非边缘区域利用大模板(如 15×15)求黑色通道 $I_{\text{nonedge}}^{\text{dark}}$;

(4)整幅图像的黑色通道为边缘区域的黑色通道 $I_{\text{edge}}^{\text{dark}}$ 与非边缘区域的黑色通道 $I_{\text{nonedge}}^{\text{dark}}$ 之和,即

$$I^{\text{dark}} = I_{\text{edge}}^{\text{dark}} + I_{\text{nonedge}}^{\text{dark}}$$

(5)深度图像 $d(x) = I^{\text{dark}}$;

(6)根据式(5)求得相应的透射图 $t(x)$.

得到透射图之后,利用式(2)求得恢复后的结果,本文中 t_0 仍为 0.1.利用该优化透射图方法进行图像去雾处理,大大缩短了计算时间,并且复原结果在天空区域有一定的改善,如图 2 (d)所示.但是,对某些图像,He 算法并不能准确地找到大气光值.

3.2 改进大气光的求解

大气光 A 的计算近似等于阴天天空的像素最大值[3],也可以将雾最浓处的像素最大值作为大气光,但是怎样判断雾最浓区域或者天空区域,是个难题.以前大多数单幅图像去雾算法中,常常将图像中具有最大亮度的像素值作为大气光 A [1,2].利用 He 算法求得大气光,对于天空区域很大的雾天图像(如图 2)或者含有白色物体较小的雾天图像都能得到准确的大气光值.但是对于含有大块白色物体,其像素值大于阴天天空像素值的图像就会造成一定的误差,因为黑色通道无法滤掉比模板大的白色物体,如图 3 所示.因此,正确地寻找雾天图像中的天空区域或者雾最浓区域是求解大

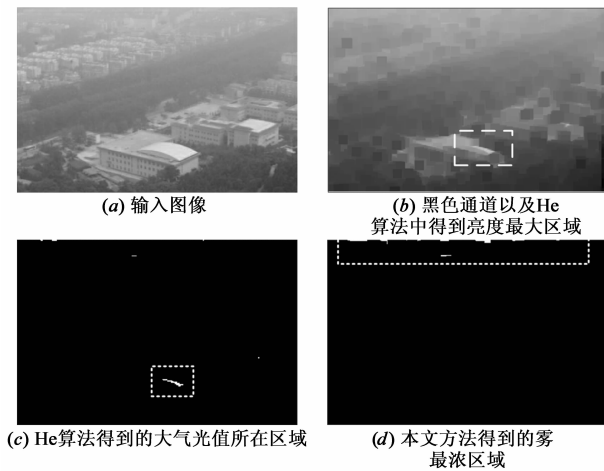


图3 (源自文献[3])计算大气光

气光的关键。

对于天空区域或者雾最浓区域,由于受到大气光的影响较为严重,其像素值 I_{sky} 一定是整个黑色通道图像中相对较大的,设黑色通道图像最大像素值为 $I_{\text{min_max}}$,则 $I_{\text{sky}} \in \lambda I_{\text{min_max}}, \lambda \in [0.9, 1]$;另外由于这部分区域相对平滑,细节相对较少,像素邻域内的边缘像素数与总边缘像素数的比值 N_{edge} 相对较小,即 $N_{\text{edge}} \in \frac{N_{\text{min_edge}}}{\lambda}, \lambda \in [0.9, 1]$,其中, $N_{\text{min_edge}}$ 是所有像素 N_{edge} 的最小值.同时满足这两个条件才是雾天图像中的天空区域或者雾最浓区域.在文献[5]中介绍了类似方法,但阈值 T_p 的取值是个固定值 0.001,不具有鲁棒性.这里,我们适当扩大 I_{sky} 和 N_{edge} 的取值,这样可以扩大天空区域或者雾最浓区域的范围,因此设:

$$T_v = 0.9 I_{\text{min_max}} \quad (6)$$

$$T_p = \frac{N_{\text{min_edge}}}{0.9} \quad (7)$$

改进大气光的实现步骤如下:

- (1)求原图像 $I(x)$ 的黑色通道 $I_{\text{min}}(x)$,模板大小为 15×15 ;
- (2)计算原图像灰度图的边缘信息,得到二值图像;
- (3)对每个边缘处的像素值,计算其邻域内含有的边缘像素数和总边缘像素数的比值,得到百分比图像 $N_{\text{edge}}(x)$;
- (4)只有满足 $I_{\text{min}}(x) > T_v$ 并且 $N_{\text{edge}}(x) < T_p$ 的像素才被认为是天空区域或者雾最浓区域;
- (5)在求得天空区域或者雾最浓区域中求取原图的最大像素值作为大气光 A 值.

对图 3(a)利用该方法求得的大气光值,如表 1 所示,得到的去雾结果如图 4 所示,由于 He 算法中使用了不准确的大气光值,使得远处景物的复原结果严重失真.因此,为防止这种情况发生,我们对一幅图片同时

进行大气光改进和透射图优化处理,算法流程图如图 5 所示.

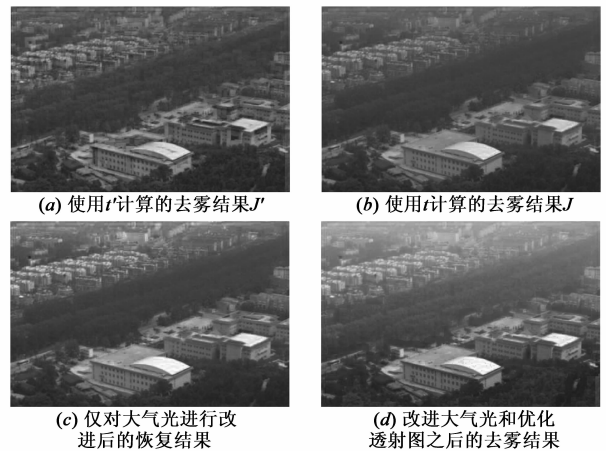


图4 (源自文献[3])He算法与本文算法比较,输入图像为图3(a)

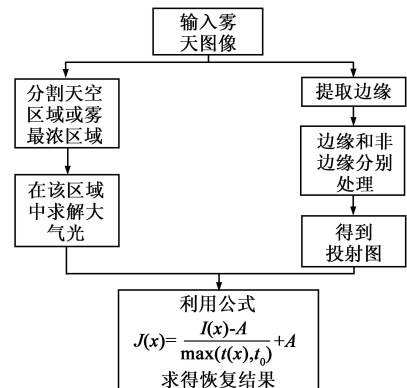


图5 本文快速优化方法流程图

表 1 He 算法与本文方法计算的大气光值比较

	He 算法	本文方法
图 3	(0.9137, 0.8745, 0.8353)	(0.7725, 0.7765, 0.8078)
图 1	(0.8706, 0.7725, 0.7529)	(0.7294, 0.6588, 0.6941)

3.3 算法复杂度分析

在 He 算法中,消耗最大的是计算 Matting Laplacian 矩阵 L ,对一幅 $P \times Q$ 大小的图片,其 L 矩阵大小为 $M \times M$, M 为整个图像的像素总数 $P \times Q$.计算 L 矩阵中一个像素的值,需要计算 9 个模板(设模板大小为 $m \times m$)的均值和方差(只在接近图像边缘处的像素可以少于 9 个模板),每次计算复杂度为 $O(9m^2)$,整个 L 矩阵需要进行 $M \times M$ 次循环,因此总共的计算复杂度为 $O(9M^2m^2)$,虽然 L 用稀疏矩阵的方式存储,但依然需要消耗大量的内存空间,存储大小约为初始图像的 9 倍左右.在本文中,不采用 soft matting 算法,利用边缘和非边缘分别求取其不同模板下的黑色通道得到透射图,其计算复杂度仅为 $O(PQm^2)$,且存储大小为初始图像大小,大大减少了内存消耗,优化速度可以提升 10 至 15 倍,如表 2 所示.

表 2 He 算法与本文方法计算速度比较

	Image Size	He's/s	Ours/s
图 4	303 × 457	20	2.14
图 2	225 × 300	17	1.01
图 6	318 × 243	18	1.56

4 实验结果

我们在操作系统为 Windows 7、CPU 为酷睿 2 双核 2.8GHZ 处理器、系统内存为 4GB 的普通 PC 机上利用 MATLAB 实现了 He 算法与本文方法,并进行了比较.本节将从计算速度和资源消耗、视觉效果方面,比较本文优化方法与 He 方法的处理结果.

4.1 大气光修正结果

从图 4 中可以看到,He 算法处理出来的结果有失真现象,仅对大气光进行改进后,大大改善了恢复结果,如图 4(c),但是内存消耗和计算时间并没有优化,因为仍然采用的是 soft matting 算法.另外,本文采用标准差、平均梯度及信息熵作为去雾效果的定量评价指标,评价结果如表 3 所示.从表 3 中也可以看出,利用本文方法求解的大气光得到的图像复原结果大大优于 He 图像复原结果,与主观评价一致.

表 3 对图 4 原图和恢复后图的客观评价结果

		标准差	平均梯度	信息熵
图 3(a)原图	r	41.85	4.28	7.33
	g	31.36	2.13	6.90
	b	35.85	1.83	7.02
	gray	34.59	2.54	7.03
图 4(b)He 算法	r	42.38	6.81	7.08
	g	24.45	2.78	6.31
	b	34.22	2.61	7.00
	gray	29.20	3.42	6.65
图 4(c)改进 1	r	54.85	8.73	7.40
	g	32.39	3.66	6.68
	b	34.17	3.12	6.94
	gray	37.82	4.47	7.00
图 4(d)改进 2	r	56.60	7.32	7.61
	g	40.17	3.52	7.18
	b	45.38	3.05	7.36
	gray	44.41	4.08	7.35

图 1 中也含有大块白色物体,且其像素值大于阴天天空像素值,利用 He 算法得到不准确的大气光值使得恢复的结果呈现失真.利用本文方法改进大气光值后,大大改善了恢复后的结果,如图 1(j)所示.He 算法和本文方法所得的大气光值如表 1 所示,客观评价结果如表 4 所示.

4.2 透射图优化结果

比较图 2 中的 (d) 和 (c) 可以发现,对天空区域的去雾处理,本文算法要优于 He 算法.由于 He 算法是利

用式(4)求的透射图,透射图与黑色通道呈线性关系,若图像中大气光 A 值小于图像的最大像素值(如文献 [3] 中的白色轿车图像),那么利用式(4)求得的透射图无法保证所有的像素值为正,并且天空区域和大气光值很接近,导致天空区域的透射率很小,用式(2)恢复的图像天空区域容易失真.而我们采用式(5),透射图和黑色通道呈曲线关系,计算的透射图可以保证都是正值,并且不易形成噪声.

表 4 对图 1 原图和恢复后图的客观评价结果

		标准差	平均梯度	信息熵
图 1(a)原图	r	26.32	3.91	6.73
	g	16.99	1.68	6.02
	b	21.29	1.39	6.21
	gray	19.75	2.14	6.27
图 1(f)He 算法	r	31.88	6.00	6.65
	g	18.49	2.41	5.91
	b	25.65	2.44	6.49
	gray	21.42	2.87	6.12
图 1(j)改进 1	r	43.81	7.97	7.02
	g	27.80	3.42	6.50
	b	31.46	3.15	6.78
	gray	31.01	4.05	6.62
图 1(l)改进 2	r	38.85	6.82	7.12
	g	25.76	3.07	6.55
	b	30.73	2.74	6.74
	gray	28.93	3.69	6.74

另外,利用 3.1.2 部分介绍的方法对透射图进行优化求解,没有采用 soft matting 算法,大大提升了计算速度,缩短了计算时间,如表 2 所示.

在主观评价后,对其进行客观评价.评价结果如表 5 所示.

表 5 对图 2 原图和恢复后图的客观评价结果

		标准差	平均梯度	信息熵
图 2(a)原图	r	54.24	4.54	7.26
	g	60.48	3.44	7.24
	b	60.85	2.57	7.15
	gray	58.25	3.49	7.25
图 2(c)He 算法	r	56.81	6.46	7.03
	g	62.90	4.21	6.66
	b	61.56	2.74	6.26
	gray	59.99	4.23	7.40
图 2(d)改进 1	r	60.75	6.07	7.34
	g	68.48	4.23	7.19
	b	67.89	2.68	6.61
	gray	65.35	4.27	7.44
图 2(f)改进 2	r	54.01	6.25	7.45
	g	60.83	4.24	7.30
	b	59.69	2.59	6.84
	gray	57.72	4.23	7.41

4.3 本文算法的综合处理结果

综合利用本文改进大气光和透射图优化的方法,

可以同时提高计算速度和改善恢复效果,尤其对利用 He 算法求解大气光有误差的图像,改善效果更加明显.

图 4(d)和图 1(l)是利用流程图 5 同时改进大气光和透射图的恢复结果,可以看到本文方法比 He 算法恢复的结果更自然、更真实.从表 2、表 3 和表 4 也可以对比本文方法和 He 算法的计算速度和客观评价结果.

图 2(f)是在优化透射图的基础上又利用本文方法

求解的大气光值得到的恢复结果,比较图 2(d)和 2(f)可以发现,实验结果差别不大,说明对于天空区域很大的图像 He 算法能够得到准确的大气光值.

图 6 是根据流程图 5,得到透射图和大气光,进行一次完整的去雾结果展示.其客观评价结果如表 6 所示,计算速度如表 2 所示.

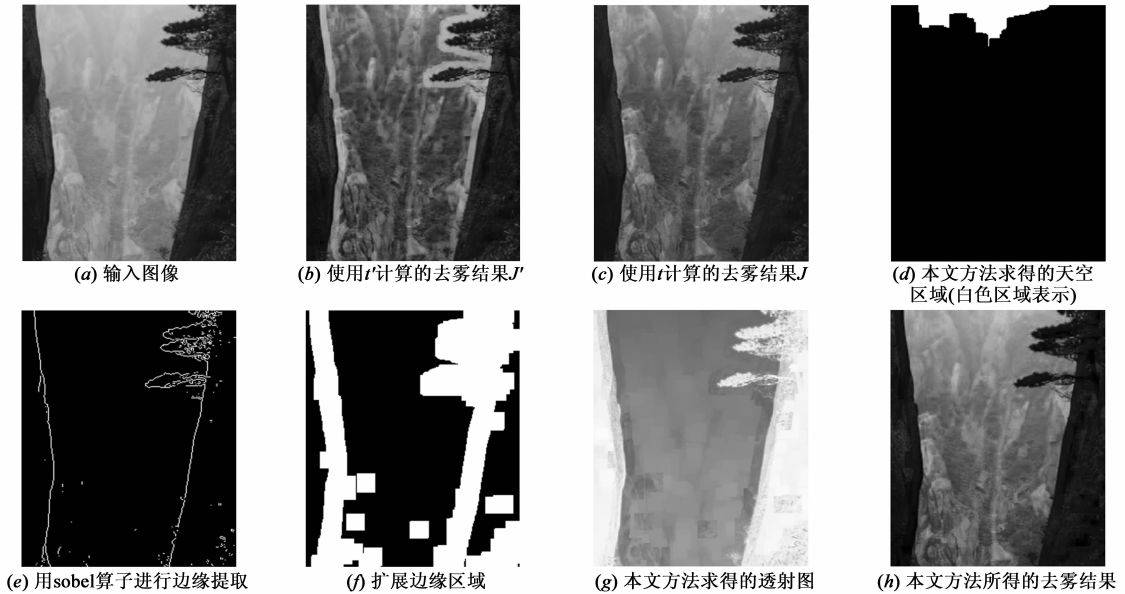


图 6 (源自文献[8])He算法与本文方法比较

表 6 对图 6 原图和恢复后图的客观评价结果

		标准差	平均梯度	信息熵
图 6(a)原图	r	60.15	4.61	7.12
	g	61.53	3.66	7.09
	b	65.24	3.56	7.12
	gray	61.46	3.84	7.09
图 6(c)He 算法	r	43.42	6.08	7.22
	g	46.63	3.95	7.22
	b	49.20	3.52	7.17
	gray	45.48	4.30	7.20
图 6(h)本文方法	r	49.46	5.65	7.22
	g	54.53	4.04	7.24
	b	57.98	3.72	7.09
	gray	53.08	4.27	7.21

5 总结与展望

本文利用黑色通道先验知识,在 He 算法的基础上进行了一系列改进.首先通过确定天空区域或者雾最浓区域准确地选取大气光;然后对图像边缘部分和非边缘部分分别求取黑色通道,利用黑色通道和深度的关系得到的透射图与深度信息成指数曲线关系,使得无穷远处物体的透射率更加准确,从而改善天空的恢复效果.另外,本文方法极大减少了资源消耗,提高了

处理速度.

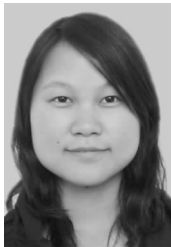
但是,本文方法仍基于黑色通道优先假设,所以当场景违反该假设时,依然难以确保得到准确的结果.理论上,暗通道处理后的图像,近处区域的亮度应该比远处物体更低;但近处若存在大片灰白色物体,求透射图时,该物体可能会被当作有雾区域处理,这样计算出的透射图准确度会较差.另外,本文方法尚不能解决大气光不连续的现象,因为求解天空区域方法会错误地选择大气光较强区域作为天空区域,这些都是今后值得开展的工作.

参考文献

- [1] R Tan. Visibility in bad weather from a single image[A]. Proceedings of IECVPR [C]. Anchorage, Alaska: IEEE Computer Society, 2008. 1-8.
- [2] R Fattal. Single image dehazing[J]. Proceedings of SIGGRAPH, 2008, 27(3): 1-9.
- [3] K He, J Sun, X O Tang. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [4] 方帅,王勇,曹洋,等.单幅雾天图像复原[J].电子学报, 2010, 38(10): 2279-2284.

- Fang Shuai, Wang Yong, Cao Yang, et al. Restoration of image degraded by haze[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2279 – 2284. (in Chinese)
- [5] Jing Yu, Qingmin Liao. Fast single image fog removal using edge-preserving smoothing[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)[C]. Piscataway, NJ, USA, 2011. 1245 – 1248.
- [6] 胡伟,袁国栋,董朝,等.基于暗通道优先的单幅图像去雾新方法[J].计算机研究与发展,2010,47(12):2132 – 2140. Hu Wei, Yuan Guodong, Dong Chao, et al. A new single image dehazing method based on dark channel prior[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(12): 2132 – 2140. (in chinese)
- [7] S G Narasimhan, S K Nayar. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(3): 233 – 254.
- [8] Shuai Fang, Jiqing Zhan, Yang Cao, et al. Improved single image dehazing using segmentation[A]. IEEE International Conference on Image Processing[C]. Hong Kong, 2010. 3589 – 3592.

作者简介



褚宏莉 女.1990年3月出生,山东菏泽人.2010年毕业于山东大学自动化专业,现为上海交通大学航空航天学院硕士研究生,研究方向为数字图像处理.



李元祥 男.1968年10月出生,安徽和县人.1990年、1993年和2001年分别在解放军通信工程学院、空军工程学院和清华大学获工学学士、硕士和博士学位.2002—2004年在新加坡国立大学作 Research Fellow.现为上海交通大学航空航天学院副教授,主要从事目标检测与识别、遥感信息处理、汉字识别等方面的研究工作.

E-mail: yuanxli@sjtu.edu.cn